Проблеми застосування гравімоніторингу у вивченні динаміки земної кори

Ю.І. Дубовенко, к.ф.-м.н., н.с., Інститут геофізики НАН України,
м. Київ, пр. Палладіна, 32, тел. 44-424-2052, dubovenko@igph.kiev.ua

У вивченні геодиначічних явищ земної кори за даними гравіметрії, як одного з найбільш доступних засобів, доводиться зважати на дві обставини: завдяки технологічному прогресу (удосконаленню апаратури і топогеодезичного забезпечення GPS) зросла точність і продуктивність гравіметричних знімань, а через економічний спад різко знизився обсяг вимірів.

Перша обставина сприяє перегляду методів обробки отриманих даних, зокрема, точнішому обліку поправок Буге [1], а друга, за необхідності виявляти глибинні джерела аномалій, вимагає перегляду методики вимірів, щоб врахувати тонкі особливості (варіації) гравіаномалій. Ці особливості можна задіяти через додаткову змінну – час.

Світові „тренди" геофізичних спостережень тяжіють до 4D моніторингу [2] досліджуваної площі, вивчаючи еволюцію гравітаційного поля за час експлуатації ділянки чи в інтервалі її динамічної активізації; деякі аспекти моніторингу ілюструє [3]. Застосування *повторних* спостережень у певній області для гравіметрії не нове, хоча *безперервними* в часі їх назвати важко, на відміну від сейсмометрії.

Однак, при проведенні високоточних вимірів, параметром яких є сила тяжіння, варто обов'язково досліджувати й ураховувати її варіації (на що вказувалось ще в [4]), щоб ввести відповідні поправки у гравітаційні знімання різних років. Зокрема, виявлені неприпливні квазіперіодичні варіації (КПВ) сили тяжіння на новій методологічній, методичній і метрологічній базі і обґрунтована їхня природа [4]. Внаслідок кореляції великомасштабних густинних неоднорідностей мантії і припливних параметрів Землі [5] можлива крос-кореляція КПВ і цих параметрів, особливості якої ще потрібно вивчати.

Крім того, виявлено [6] неприпливні варіації *вертикального градієнта* (різниці відліків значень сили тяжіння на різних рівнях зі сталим перепадом висот, далі ВВГ) сили тяжіння. На перший погляд, вони мають логічно випливати з варіацій сили тяжіння, але розрахункова амплітуда таких варіацій дуже мала, тоді як реальні амплітуди на кілька порядків вищі. Основні періоди неприпливних варіацій сили тяжіння, як і ВВГ, корелюють з періодами *власних коливань* Землі. Довготривала складова цих варіацій (за рік) корелює з положенням осі обертання Землі відносно Сонця (мінімальні амплітуди – взимку, максимальні – у квітні-травні і жовтні-листопаді). Хаотичні флуктуації руху Сонця і Місяця можуть породжувати неприпливні ВВГ, але доведення цього припущення – справа майбутнього.

Зв'язок аномальних змін ВВГ із проявами землетрусів у вигляді мінімуму ВВГ задовго до початку поштовхів дозволяє припустити, що джерелом власних коливань Землі є не землетруси, а навпаки, власні коливання є спусковим гачком землетрусів. Це дозволяє прослідкувати динаміку земної кори за критерієм середньоквадратичної похибки зміни амплітуди одиничного виміру ВВГ. Можливість тлумачення аномалій ВВГ, як передвісників землетрусів, ще потребує опрацювання.

Виділяють корисний сигнал шляхом осереднення у ковзному вікні, спектральним аналізом (періодограми[1], оцінка спектральної густини). Крива зміни ВВГ – це складні квазіперіодичні флуктуації з різними періодами, амплітудами і фазами (рис. 1), і виділити певну залежність за варіаціями з окремих кривих неможливо. Але, підсумовуючи криві варіацій за тривалий відтинок часу (від тижня до року), можна виділити певні періодичні варіації: з кривих ВВГ V_{zz} знімають для кожного хвилинного відтинку часу значення ординат і для кожної хвилини 1-годинного інтервалу (співпадає з основним фоном власних коливань Землі 54-60 хв.) їх осереднюють, що взаємокомпенсує випадкові варіації чи ті, що мають інший період.

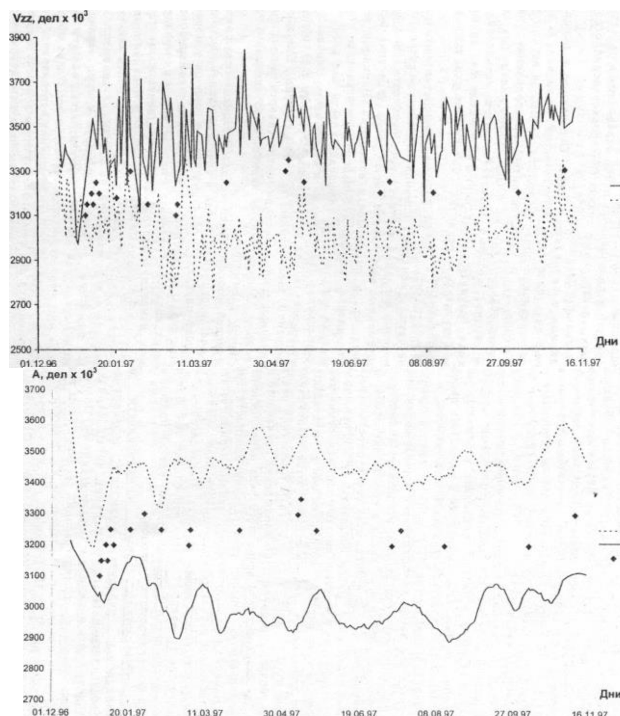


Рис. 1. Графіки варіацій V_{zz}: прямі та осереднені за місяць; ромбами позначено катастрофічні землетруси [6].

Автор [6] пропонує задіяти середньоперіодні ВВГ для визначення добротності мантії Землі: зі зменшенням періоду коливань на виміри впливають ближчі до поверхні шари геологічного розрізу, що відбивається в картині ВВГ. У верхній частині розрізу ця картина ускладнюється через зрослу мінливість пружних властивостей гірських порід, викликану зміною літології і цілісності шарів. Короткоперіодні ВВГ неможливо виміряти через те, що крок дискретизації спостережень часто більший за період коливань: за такого співвідношення ці коливання зливається з випадковими завадами вимірів.

Зв'язок дисперсії ВВГ з розломними зонами можна використати для оцінки тектонічної активності розломних зон (регіонального і локального (інженерно-будівельного) сейсмотектонічного районування): інтенсивність похибки залежить від активності розломів і якщо ці зони „заліковані" (масив стає майже однорідним), така зона не проявиться у дисперсії ВВГ. Враховуючи, що сила тяжіння є функцією маси, а вертикальний градієнт – функцією зміни густини, отримуємо нові можливості для вивчення глибинної будови Землі.

Врахування величин КПВ та ВВГ сили тяжіння є неодмінною передумовою для застосування гравітаційного моніторингу, що не зауважується у [2]. Вивчення поведінки вказаних величин доцільно розпочати на профілях, вказаних у [4].

[1] Коефіцієнти у розкладенні часового ряду за гармоніками $\exp(2\pi i\omega t/n)$, що виражає амплітуду певної гармоніки.

Гравітаційний моніторинг – це ряд *періодично* повторюваних у реальному часі *безперервних* протягом фіксованого часового відтинку (рис. 2) мікрогравіметричних вимірів гравітаційного поля і обробка його даних з урахуванням *впливу* навколишнього середовища та сфери застосувань. Величина часового відтинку залежить від якості вимірів, міри невизначеності результатів спостережень, динаміки (амплітуди і частоти) поля.

Його фізична основа – безперервний зв'язок динаміки гравітаційного поля і параметрів середовища. Просторовий розподіл варіацій вертикальної похідної V_z потенціалу сили тяжіння *прямо корелює* із площинним розподілом густин, а часові варіації V_z чітко визначають вертикальні варіації насичення флюїдів.

Апаратна основа моніторингу – спільні великомасштабні виміри перевищень рельєфу за даними GPS і абсолютних значень сили тяжіння. Відносні виміри сили тяжіння дешевші, але обмежені прив'язкою до опорної мережі і синхронністю обліку „сповзання нуля". У наших умовах, однак, такі виміри за належного методичного забезпечення [4] мають перспективу.

Мета моніторингу – оцінка глибини до джерела аномалій і зміни об'єму за даними деформації рельєфу (з даних GPS) – вимагає знання приповерхневого розподілу мас (з даних гравіметрії).

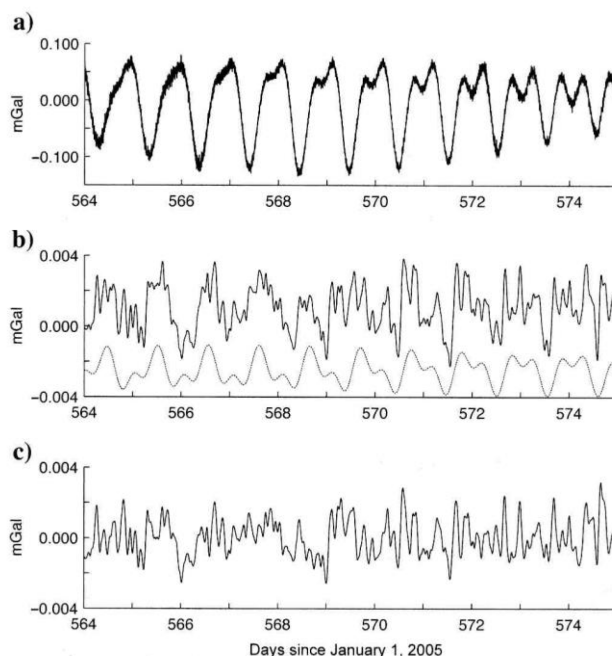


Рис. 2. 11-денний ряд вимірів сили тяжіння: без фільтрації, зі смуговою фільтрацією і з поправкою за припливний ефект.

У дослідженнях з 4D гравімоніторингу[2] відзначена амплітуда сигналу в діапазоні від 20 до 80 мГал, у межах діючих вулканів вона зростає до 300-600 мГал, а в межах водних басейнів ~ 200-250 мГал при нелінійному обліку „сповзання нуля".

Виділяють слабкий сигнал на тлі перешкод за відомими у гравіметрії методами кореляційного аналізу і обчислення складових градієнтів у прямих вимірах сили тяжіння. У [2] виділяють корисний сигнал з різницевої аномалії $\Delta g_d = \Delta g_m - \gamma h_z - \Delta g_{def} - \Delta g_w$, де Δ – різниця між сусідніми відліками у часі, $\gamma = -308.6$ мГал/м – поправка у вільному повітрі, h_z – вертикальний зсув (відносне підняття-опускання), Δg_{def} – аномалія Буге деформації (зміни об'єму через стиск середовища навколо джерела, що означає зсув густинних меж у неоднорідному середовищі); $\Delta g_w = 2\pi G \rho_w \varphi \delta_z = 42 \varphi \delta_z$ – вплив ґрунтових вод. Також порівнюють результати фільтрації з даними, отриманими з контрольного пункту, близько розташованого від ділянки спостережень.

На рівнинних ділянках на території України корисний сигнал матиме малий градієнт, тому слід враховувати вплив перешкод іншими методами (зміна геометрії мережі спостережень, часова фільтрація, обчислення похідних і т.п.), пропонованими у [4]. Вивчення метрологічних нюансів доцільне на базі геодинамічного полігону з готовою інфраструктурою (можливо, на базі однієї з ділянок Карпатського відділення ІГФ).

Переходячи до умов стійкого тлумачення даних, слід зазначити, що виміри на *регулярній* мережі і перерахунок значень за інтегралом Пуассона придатні для регіональних досліджень [8], а у локальних умовах гравімоніторингу [9] має ряд недоліків [10]. Іноді організація регулярної мережі неможлива, а перерахунок з нерегулярної мережі на регулярну складніший, ніж обернене відновлення будови середовища.

Розв'язання обернених задач гравіметрії з даними на псевдорегулярних мережах із застосуванням моделей середовища типу „безкінечний профіль" утворює погано обумовлені системи лінійних рівнянь із беззмістовними результатами. Через це і коротку довжину реальних профілів доцільний альтернативний підхід [10] – система лінійних інтегральних рівнянь зі швидкоспадними ядрами:

$$S_{n+1}^{+}(x) = v(x) - \frac{1}{2\zeta_n(x)} \int_{-\infty}^{\infty} S_n^{+}(\xi) \left(\cosh \frac{\pi(\xi - x)}{2\zeta_n(x)} \right)^{-1} d\xi + S_n^{+}(x), \quad S_{n+1}^{-}(x) = v(x) - \frac{1}{2\zeta_n(x)} \int_{-\infty}^{\infty} S_n^{-}(\xi) \left(\tanh \frac{\pi(\xi - x)}{2\zeta_n(x)} \right)^{-1} d\xi + S_n^{-}(x)$$

$$\zeta_0(x) = S_0^{+}(x) + S_0^{-}(x) = v(x), \; \zeta_0(x) = S_0^{+}(x) + S_0^{-}(x), \; n = \overline{0, \infty}.$$

З урахуванням цього методика [9] дієва за умов, що регіональний фон – поліном 1-го ступеня, відомі *густини* і *положення* меж тяжіючих тіл на поверхні, а тіла близькі або мають спільні контакти. Одначе, ми пропонуємо замінити згадані у методиці [9] програми на комплекс [11] і програми з [10].

У [2] невраховано і таку особливість варіацій гравітаційного поля: величини його похідних залежні від флуктуацій аномальних атмосферних мас, снігових мас, рівня ґрунтових вод, лісистості і змін рельєфу через техногенну діяльність [12]. Урахувати ці ефекти можна, вносячи відповідні поправки [12] у розв'язок прямих задач гравіметрії на дослідних територіях.

Необґрунтоване спрощення моделей середовища з метою зниження неоднозначності у багатьох випадках є причиною невірних обчислень геометрії джерел, вертикального і латерального розподілу густинних неоднорідностей

[2] Усі статті спецвипуску Geophysics. – 2008. – **73**, № 6, присвячені гравітаційному моніторингу.

тей, особливо у випадках, коли середовище навколо аномального джерела далеке від припущень про однорідність. Надійне тлумачення одержують за *відомої геометрії* тіл, що тяжіють, (із сейсморозвідки) і комплексної інтерпретації поля сили тяжіння та деформацій рельєфу.

Враховувати наявну апріорну інформацію про середовище пропонуємо шляхом:

1. побудови належних модельних зображень (зіркові області відомої густини усередині компактних множин у банаховому просторі даних) [10];
2. додання у функціонали типу нев'язки у регуляризуючих алгоритмах стабілізаторів диференціального виду, власні функції яких збігаються з власними функціями вихідних операторів [13].

Розв'язки обернених задач за даними гравітаційного моніторингу доцільно отримувати за регуляризуючими алгоритмами з урахуванням розробок [10, 11]. З них можна відновити *загальну* картину варіацій густини, але не абсолютні значення густин. Окрім завдань геодинаміки, ці розв'язки можна задіяти для моніторингу стану екосистем.

1. *Бычков С.Г.* К вопросу о вычислении аномалий силы тяжести в редукции Буге// // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. - Г., 2007. - С. 73-77.
2. *Battaglia M., Gottsmann J., Carbone D., Fernandez J*. 4D volcano gravimetry // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. - P. WA3-WA18.
3. *Юргин О.В.* Высокоточная гравиразведка при измерении гравитационных эффектов малоглубинного происхождения: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – 25.0010. Пермь, 2006. – 26 с.
4. *Собакарь Г.Т.* Квазипериодические вариации силы тяжести Земли, их природа и научно-прикладное значение // Геофиз. сб. АН УССР. – Вып. 46. – 1972. – С. 31-42.
5. *Лубков М.В*. О влиянии крупномасштабных неоднородностей мантии на суточные числа Лява // Геофиз. журн. – 2010. 32, № 6. (в печати).
6. *Чирков В.Н.* Неприливные вариации вертикального градиента силы тяжести: Автореф. дис. … канд. геол.-мин. наук. – 04.00.12. – Воронеж, 1998. – 24 с.
7. *Собакарь Г.Т.* Исследования квазипериодических изменений силы тяжести на Украине и сопредельных территориях // Геофиз. журн. – 3, 1981. – № 5. – С. 53-59.

Алексидзе М.А. Решение некоторых основных задач гравиметрии. – Тб.: Мецниереба, 1985. – 412 с.

8. *Davis K., Li Y., Batzle M*. Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. - P. WA61-WA69.
9. *Болотнова Л. А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В. В. Филатов, Л. А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. – Г., 2007. – С. 43-44;
10. *Дубовенко Ю. И.* Определение контактной границы по значениям производных логарифмического потенциала на существенно ограниченных множествах: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. 04.00.22 / ИГФ НАНУ. – Киев, 2005. – 19 с.
11. *Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Павлюк Е.В., Шарыпанов В.М.* Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами 1-го рода и визуализации в интерактивном режиме 3-хмерных геофизических моделей и их полей // Геофиз. журн. – 2004. – **26**, № 1. – С. 3-13.
12. *Двуліт П.Д.* Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі. – Дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01. / Львівська політехніка. – Львів, 1999. – 225 с.
13. *Черная О.А*. Об устойчивых способах решений задач определения звездных областей, близких к заданным. Ч. 1, 2 // Геофиз. журн.– 1999. – **21**, № 3. – С. 100-118; № 6. – С. 51-71.

Dubovenko Yu.I. Problems of using of gravity monitoring in the study of the Earth's crust dynamics

In continuous gravity monitoring it's need to take into account the nontidal effects such as a quasiperiodic gravity fluctuations and a gravity vertical gradient variations. Due to the peculiarities of gravity monitoring its data processing on the short profiles is offered to execute by the expressions with fast decaying cores, and gravity fluctuations due to impact of small intensive geophysical factors one should take into account by the Dvulit's techniques.

Дубовенко Юрій Іванович, к.ф.-м.н., наук. співробітник Інституту геофізики НАНУ,
тел. 063-3909251, 0-4577-41656 (д.), 0-44-4242052 (р.), dubovenko@igph.kiev.ua,
адреса: 03142, Київ-142, пр. Палладіна, 32, к. 304. Доповідь: усна.
Секція: Геофізичні методи дослідження проблем довкілля або Теорія фізичних полів Землі.
Надіслати на: phis_geo@franko.lviv.ua